

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

UMA AULA SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO PARA O ENSINO MÉDIO

Aluno: Bruno Henrique Matos da Costa

Orientador: Prof. Vitorvani Soares

2005/1

Ficha catalográfica

Matos, Bruno Henrique

Uma Aula sobre o Efeito Fotoelétrico para o Ensino Médio, Bruno Henrique Matos —
Rio de Janeiro: Projeto de Instrumentação para o Ensino de Física — Instituto de
Física/UFRJ, 2005

1. Efeito fotoelétrico. 2. Ciência – Ensino Médio. 3. Física moderna.

I. Título

Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de elaborar e dar continuidade à minha carreira. Dedico a toda minha família pelo apoio e compreensão nas melhores e piores situações e por nunca me terem me abandonado nos momentos mais difíceis da vida.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que acreditaram e se empenharam para a realização do trabalho, em especial ao meu grande orientador Vitorvani Soares pela paciência e dedicação. Aos meus amigos da UFRJ pela motivação dada ao trabalho, em especial ao Edson, André e Carlos Alexandre. Ao meu grande amigo Cristiano Timbó pelas grandes risadas, acontecimentos hilários e incríveis equívocos cometidos. A minha namorada Márcia Cristina do Valle Neves pelo amor e carinho concedido nos momentos mais difíceis. E finalmente agradecer a banca de professores responsáveis pela leitura do trabalho.

ÍNDICE

Resumo	6
1. Introdução	7
2. Aspectos didáticos	8
Quadro atual do ensino de Física	8
Justificativa da inserção do efeito fotoelétrico no ensino médio	9
Propostas dos PCNEM e contextualização do efeito fotoelétrico para o ensino de Física	9
Habilidades e competências a serem desenvolvidas com o efeito fotoelétrico	11
3. Evolução da ciência e o efeito fotoelétrico	12
Os primórdios da comunicação	12
O efeito fotoelétrico	14
A experiência de Hertz	15
A experiência de Hallwachs	17
A natureza do fenômeno fotoelétrico	18
Lenard encontra algumas surpresas	19
A interpretação de Einstein	21
A experiência de Millikan	22
4. Diodos emissores de luz — LEDS	25
O que é um Diodo?	26
Semicondutores	26
Semicondutores dopados	27
Comportamento geral dos diodos	30
Como pode o diodo emitir luz?	31
5. Medindo a constante de Planck usando um LED	33
Medida da curva característica de um LED.	34
Objetivos	34
Descrição dos aparatos	34
Procedimento experimental	35
Resultados	38
Conclusões	41
Referências	42

Resumo

Neste trabalho, procuramos mostrar as problemáticas que estão relacionadas ao ensino de física e apresentar algumas sugestões visando dar uma contribuição para implementar a física moderna no cotidiano da sala de aula. Neste quadro, a física moderna poderá ser utilizada pelo professor como uma ferramenta pedagógica para contribuir no processo cognitivo. Sendo assim, a implementação de demonstrações e experiências nesta área tornam-se necessárias para a complementação do processo de ensino-aprendizagem.

Com o intuito de orientar os professores de física no Ensino Médio, vamos inicialmente efetuar uma abordagem conceitual e geral sobre a descoberta do efeito fotoelétrico e ao longo da explanação faremos indicação dos recursos educacionais que podem ser utilizados em uma prática pedagógica associada ao fenômeno.

1. Introdução

A descoberta do efeito fotoelétrico teve grande importância para a compreensão mais profunda da natureza da luz. Porém, o valor da ciência consiste não só em esclarecer-nos a estrutura complexa do mundo que nos rodeia, como também em fornecer-nos os meios que permitem aperfeiçoar a produção e melhorar as condições de trabalho e de vida da sociedade.

Além do efeito fotoelétrico propriamente dito, também chamado de efeito fotoelétrico externo, que consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz, existe também o chamado efeito fotoelétrico interno, próprio dos semicondutores, muito utilizado nas resistências fotoelétricas, que consiste na transformação, de uma forma direta, de energia elétrica em energia luminosa.

Graças ao efeito fotoelétrico, tornou-se possível o cinema falado, assim como a transmissão de imagens animadas (televisão). O emprego de aparelhos fotoelétricos permitiu construir uma maquinaria capaz de produzir peças sem intervenção alguma do homem. Os aparelhos cujos funcionamentos se assentam no aproveitamento do efeito fotoelétrico controlam o tamanho das peças melhor do que pode fazer qualquer operário, permitem acender e desligar automaticamente a iluminação de ruas, os faróis, etc. Tudo isto se tornou possível devido à invenção de aparelhos especiais, chamados células fotoelétricas, em que a energia da luz controla a energia da corrente elétrica ou se transforma em corrente elétrica.

Há outros dois efeitos semelhantes ao efeito fotoelétrico produzidos pela radiação eletromagnética incidente em determinados materiais, que costumam ser confundidos. O primeiro deles é a fotocondutividade. Neste há um aumento da condutividade de um material semiconductor provocada pela excitação dos portadores de uma carga adicionais, causada pelos fótons da radiação incidente. Células fotocondutoras, conhecidas pelas siglas LDR (light dependent resistor), são utilizadas na aplicação desse efeito. Iluminadas elas têm baixas resistências; no escuro elas têm alta resistência. Os detectores ou chaves acionadas pela luz, como as que acendem as luzes das ruas quando escurece, são exemplos da aplicação desse efeito. O segundo é o efeito fotovoltaico. Nele, os fótons da radiação incidente provocam o aparecimento de novos portadores de carga. Os fotodiodos e os fototransistores, dispositivos mais usados em eletrônica, baseiam-se nesse efeito. A conversão de energia solar em energia elétrica se baseia também neste efeito.

No entanto, este trabalho tem como proposta, introduzir o efeito fotoelétrico no ensino médio de uma maneira bastante simples e objetivo passando pelos primórdios da comunicação indo até nosso cotidiano e um simples experimento para uma base mais didática. Falaremos dos aspectos didáticos e o atual quadro da física na atualidade, abordaremos a evolução da ciência e o processo histórico do efeito fotoelétrico, introduziremos Diodos Emissores de Luz (LEDs) e suas

propriedades e finalmente um simples experimento para calcularmos a constante de Planck usando um LED.

2. Aspectos didáticos

Quadro atual do ensino de Física

O quadro atual do ensino brasileiro não é animador, e no caso do ensino de física a situação não é diferente. Se não bastassem as precárias condições da maioria das escolas, o corpo docente se encontra desestimulado e bastante desgastado. De uma forma geral, o descaso pelo aprendizado da física pelos alunos, aliado com as metodologias de ensino inadequadas utilizadas por alguns professores (que muitas vezes massificam conteúdo), proporcionam a estes, a passagem pelo ensino médio sem aprender nada substancial sobre os métodos empregados em física.

Vejamos agora, segundo os [1] Parâmetros Curriculares Nacionais [PCNEM] (pág. 48), sobre o quadro atual da física no ensino médio, temos:

“O ensino de Física tem-se realizado freqüentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado físico efetivo. Insiste na solução de exercícios repetitivos, pretendendo que o aprendizado ocorra pela automatização ou memorização e não pela construção do conhecimento através das competências adquiridas. Apresenta o conhecimento como um produto acabado, fruto da genialidade de mentes como a de Galileu, Newton ou Einstein, contribuindo para que os alunos concluam que não resta mais nenhum problema significativo a resolver. Além disso, envolve uma lista de conteúdos demasiadamente extensa, que impede aprofundamento necessário e a instauração de um diálogo construtivo.”

Percebe-se que os PCNEM destacam bem os problemas atuais da física, que somados a toda problemática da educação (de uma forma geral), tendem a piorar ainda mais a situação do ensino de uma forma geral. Isto é consequência de um sistema educacional enciclopédico, que enfatiza muitas

vezes a educação básica como um trampolim para a formação superior, sem a preocupação de um futuro promissor para esses alunos. O ensino em física não sabe priorizar uma formação conceitual e contextualizada, de forma que se torna ineficaz e é incapaz de fornecer ao estudante habilidades e competências para este resolver sozinho os diversos futuros problemas que terá pela frente.

Vejamos agora segundo a [2] Lei de Diretrizes e Bases [LDB/96] em seu artigo 35 sobre as finalidades da educação no ensino médio, tem-se que:

“O aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico; a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.”

Observando o parágrafo acima, a educação básica falha nas exigências que são indicadas pela lei de diretrizes e bases, ou seja, é um dos papéis do ensino em física cumprir com estas finalidades. Como solução para estes problemas torna-se necessária uma pequena reformulação no ensino de física, com a inserção de novos temas que pareçam mais atraentes para os alunos. O começo para os professores é (acima de tudo) exercer a profissão com dedicação, pois os mestres são uma das principais fontes de educação, onde a peça principal não é o professor, e sim o aluno.

Justificativa da inserção do efeito fotoelétrico no ensino médio

Hoje em dia, os alunos apresentam um certo desinteresse por alguma disciplina, e quando despertam algum interesse por alguma matéria é devido algum diferencial do professor ou da atividade envolvida na aula. Este é um dos pontos pelo qual este trabalho dedica grande atenção, que é o fato de despertar a curiosidade dos alunos sobre como ocorrem determinados fenômenos físicos. Acredita-se que, neste caso, a física moderna pode dar uma grande contribuição aos requisitos necessários para despertar nos alunos esta vontade de aprender e fornecer aos estudantes uma formação muito mais ampla, e mais contextualizada do mundo em que vivem.

A física moderna pode ser abordada diretamente em sala de aula, através de tópicos de física como a eletricidade e o magnetismo, assim como em atividades complementares de pelo menos duas horas por dia, contendo os aspectos históricos e fenômenos relacionados com o cotidiano e as diversas aplicações tecnológicas que envolvem, tornando assim esta área uma das mais abrangentes da física.

Propostas dos PCNEM e contextualização do efeito fotoelétrico para o ensino de Física

Segundo os PCNS, os conhecimentos em física devem ser contextualizados, onde é tarefa do professor inserir novos conteúdos que sejam relacionados com o cotidiano do aluno. Estes

conhecimentos devem estar vinculados aos fenômenos físicos e devem ter um significado maior que a simples resolução de um problema teórico. O parágrafo abaixo (PCNEM / pág. 50) retrata muito bem isto.

“..., é imprescindível considerar o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem a curiosidade. Esse deve ser o ponto de partida e, de certa forma, também o ponto de chegada. Ou seja, feitas as investigações, abstrações e generalizações potencializadas pelo saber da Física, em sua dimensão conceitual, o conhecimento volta-se novamente para os fenômenos significativos ou objetos tecnológicos de interesse, agora com um novo olhar, como o exercício de utilização do novo saber adquirido, em sua dimensão aplicada ou tecnológica. O saber assim adquirido reveste-se de uma universalidade maior que o âmbito dos problemas tratados, de tal forma que passa a ser instrumento para outras e diferentes investigações.”

Entre as funções do ensino de física, está a capacitação que os alunos tendem a adquirir para se tornarem independentes, a partir da utilização dos conhecimentos já adquiridos pelos alunos. Com esta habilidade desenvolvida o aluno se tornaria sagaz e estaria apto a compreender o mundo em que vivemos. Assim, o professor seria capaz de contextualizar os conhecimentos desenvolvidos em cada tópico da física tornando o processo ensino-aprendizado algo agradável e prazeroso para todos. Tudo isto poderia ser facilmente alcançado e desenvolvido com um tema tão versátil e que abrange tantos tópicos da física, como é a física moderna.

O ensino de física deve ser estimulado por trabalhos que procuram uma interdisciplinaridade, aliados aos trabalhos que têm o cotidiano como foco principal. Ambas devem apresentar o seu referencial teórico, sem distanciar a teoria da prática. Este objetivo para o ensino de física pode ser alcançado com o auxílio de outras disciplinas como: a história (evolução da humanidade e as novas descobertas que levam a mudanças de paradigmas), a matemática (ferramenta de trabalho indispensável na física) e a geografia (relação social-política entre os países desenvolvidos tecnologicamente e os que não são). Todo conhecimento contextualizado ajuda no aprendizado do aluno, fazendo uma conexão com o cotidiano e auxiliando no aprendizado, tornando-o uma atualizada.

Habilidades e competências a serem desenvolvidas com o efeito fotoelétrico

A física moderna só agora está entre os tópicos abordados no ensino médio, porém, como dito anteriormente, o tema é tão versátil que é possível introduzi-lo dentro de um caráter interdisciplinar sem a menor dificuldade.

A intenção inicial é de desenvolver primeiramente as noções qualitativas e conceituais, de forma que os alunos compreenderiam bem quais são as grandezas físicas envolvidas. Como sugestão para isto, poderíamos fazer com os alunos várias analogias com temas de seu cotidiano, para que ocorresse a construção efetiva deste conhecimento. Assim o aluno estaria motivado e encontraria alguma relação entre os conteúdos desenvolvidos na aula de física e o seu dia a dia.

As habilidades desenvolvidas pelos alunos nesta parte inicial são muitas, e entre elas destacam-se: maior facilidade para compreender os conceitos de eletricidade como também capacitação para a resolver alguns problemas teóricos ou práticos. Desta forma, certamente o aluno desenvolverá a sua capacidade intelectual tanto para serviços que podem envolver raciocínio lógico quanto para outros que necessitem de habilidade no manuseio de equipamentos ou análise de dados que será extremamente simples neste trabalho.

Ainda na parte prática, mais adiante, é proposta uma atividade que além de desenvolver os conceitos que envolvem o efeito fotoelétrico, necessitam também da análise dos dados obtidos experimentalmente. Esta experiência desenvolveria nos alunos o sentido prático de um problema de física e ajudaria a desenvolver o raciocínio lógico fundamental para resolução de qualquer problema.

A coleta de dados e a análise do problema, a partir dos resultados obtidos, seria de suma importância para a compreensão quantitativa dos conceitos físicos. Nesta etapa, poderiam ser usados recursos como: a construção de gráficos, uso de equações, solução de problemas e utilização da matemática como ferramenta de auxílio, isto tudo serviria para encontrar as soluções desejadas.

Com todas esses tópicos desenvolvidos, acredito que o aluno estará adquirindo diversas das habilidades descritas durante todo este trabalho e que são fundamentais para a formação do estudante, sabendo usar bem os conhecimentos adquiridos em física na sua profissão e no seu dia-a-dia.

3. Evolução da ciência e o efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico que possibilita diversas das mais recentes aplicações tecnológicas como a televisão e as câmeras fotográficas digitais. Apesar destes equipamentos serem considerados muitas vezes de última geração, o efeito fotoelétrico é conhecido pelos cientistas há mais de um século. Para que se possa entender melhor como se descobriu este fenômeno físico é preciso voltar no tempo para saber como era a ciência naquela época e como ela se confunde com a própria história da telecomunicação.

Os primórdios da comunicação

A luz sempre exerceu um fascínio sobre o homem e tem uma longa história como instrumento de comunicação em longas distâncias. Três mil anos atrás, a vitória grega na Guerra de Tróia foi “telegrafada” acendendo-se fogueiras no topo das montanhas. Entretanto, [3] esta “telegrafia” apresentava grandes limitações. Enquanto uma fogueira servia para enviar uma mensagem mais rapidamente que um mensageiro, a fogueira transmitia apenas uma só informação: ao sinal de sim, a guerra tinha terminado. Por sua vez, o Heliógrafo, que empregava um espelho para refletir a luz do sol em uma dada direção, podia enviar uma mensagem codificada. No século XIX, o código mais comum era o semáforo, usando bandeiras.

Tanto a fogueira quanto o Heliógrafo partilhavam das mesmas limitações como sendo lentos, impossíveis de serem usados em tempo ruim e bastante trabalhoso. Múltiplos observadores, cada um olhando para o seu vizinho, deveriam receber a mensagem e retransmití-la ao longo da cadeia estabelecida por eles. Devido a essas dificuldades, a comunicação por meio da luz ficou bastante limitada e a troca de mensagens entre os homens viajava a velocidade dos cavalos. Isto durou até os anos 1840, com a construção do primeiro telégrafo elétrico comercial.

O telégrafo elétrico transmitia sinais através de fios metálicos independentemente da meteorologia e podia ter estações repetidoras separadas por centenas de quilômetros de distância. Então, em 1876, apareceu o telefone. Por volta de 1900, apareceu o rádio, um meio de comunicação que nem precisava de fios e, por causa disso, foi denominado “wireless” — a comunicação sem fio.

Em 1818, Jacob Berzelius, um químico sueco, descobriu o selênio (do grego selene = lua). Suas propriedades químicas o colocam na tabela periódica entre os elementos metálicos e não-metálicos. O selênio tem várias formas, uma não cristalina muito comum, na cor avermelhada, uma na forma vítrea, de cor preta, e uma cristalina metálica, na cor cinza. É esta última que é fotosensitiva.[4]

Para simular um cabo telegráfico de longa distância, Wiloughby Smith [5], o eletricitista sênior da companhia Gutta Percha precisava de um material teste com alta resistência elétrica. Ele decidiu, então, usar o selênio. Para realizar seus experimentos em meados de 1848 na cidade de Londres, barras de selênio foram armazenadas em uma caixa com uma tampa de correr. Smith e a sua equipe perceberam que a resistência do metal variava de acordo com a posição da tampa. Quando a tampa estava fechada a resistência era alta e, com a tampa aberta, o selênio ficava exposto a luz e a resistência que ele apresentava era baixa. O trabalho de Smith mostrou que havia uma ligação entre a luz e a eletricidade, mas nesta época o efeito fotoelétrico era ainda desconhecido e nenhuma teoria permitia explicar os fatos experimentais observados.



Figura 1. Jacob Berzelius (1779 – 1848), o descobridor do selênio [4], e Wiloughby Smith (1828 – 1891) que antecipou o efeito fotoelétrico [5] a partir de experimentos na manufatura do telégrafo.

A partir dos trabalhos em eletricidade e magnetismo de Oersted, Ampère e Faraday, o escocês James Clerk Maxwell previu as ondas eletromagnéticas em 1864. Entretanto, somente em 1887, Heinrich Rudolph Hertz pode realizar um experimento para verificar a existência dessas ondas. Com este experimento ele demonstrou que ondas de luz e ondas eletromagnéticas são ondas de mesma natureza. Deste modo, a teoria eletromagnética de Maxwell deveria descrever todas as propriedades da luz e a de sua interação com a matéria. Com a descoberta das ondas eletromagnéticas, Hertz abriu o caminho para o desenvolvimento do rádio, da televisão e do radar.

O efeito fotoelétrico

Ao mostrar que uma máquina eletrostática oscilante poderia produzir ondas eletromagnéticas de alta frequência, Hertz abriu o caminho para o desenvolvimento das telecomunicações com a descoberta das ondas eletromagnéticas. Os seus experimentos realizados entre 1886 e 1888 demonstraram que ondas de luz e ondas eletromagnéticas são ondas de mesma natureza e, deste modo, a teoria eletromagnética de Maxwell deveria descrever todas as propriedades da luz, já conhecidas.

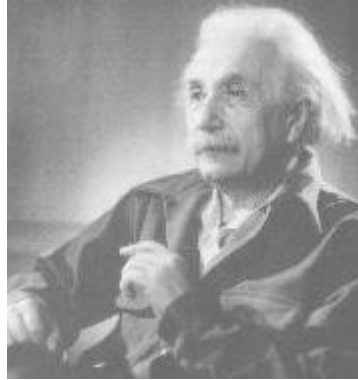


Figura 2. Albert Einstein (1879 – 1955), que vai sugerir a explicação do efeito fotoelétrico [6] em um dos três artigos que publicou em 1905, ano conhecido como o *annus mirabilis*.

Entretanto, ao realizar suas experiências, Hertz também percebeu que uma centelha (faíscas) aparecia mais facilmente entre dois eletrodos quando estes estavam polarizados negativamente e eram iluminados por uma luz ultravioleta. No mesmo ano de 1888 este fenômeno pode ser atribuído, por Wilhelm Hallwachs, à emissão de cargas negativas pelos eletrodos. Mas somente após a morte de Hertz, Philipp Lenard sugeriu que a luz ultravioleta faria com que as partículas do metal deixassem a superfície do mesmo identificando estas cargas com os elétrons e estabelecendo duas leis experimentais que descreveram o efeito fotoelétrico.

A descoberta da emissão fotoelétrica e suas leis foram um dos fortes argumentos que conduziram os pesquisadores da época, particularmente Albert Einstein, [6] a retomar o esquema corpuscular usado por Newton para descrever a luz. O fenômeno do efeito fotoelétrico está esquematicamente apresentado na figura 03.

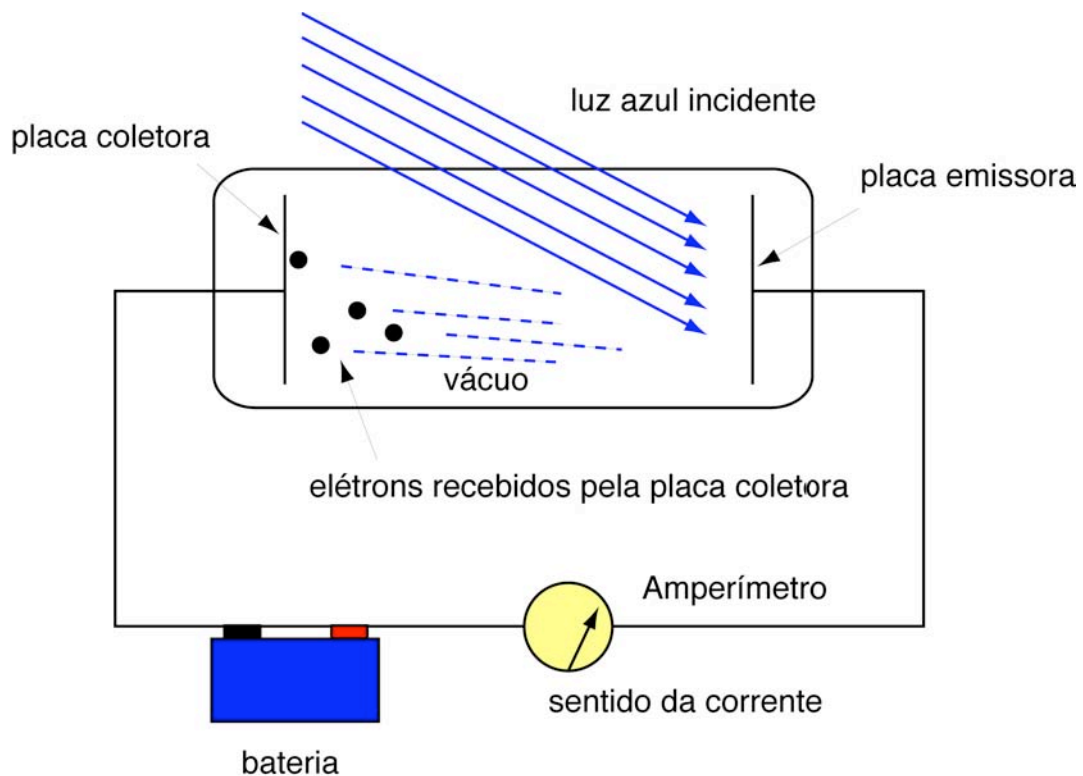


Figura 3. Esquema experimental para a produção e observação do efeito fotoelétrico.

A experiência de Hertz

Uma das mais espetaculares previsões da teoria de Maxwell do eletromagnetismo, publicada em 1865, era a existência de ondas eletromagnéticas que se movem na velocidade da luz, e a conclusão que a própria luz seria uma dessas ondas. Esta previsão desafiou os físicos experimentais a gerar e detectar a radiação eletromagnética usando alguma forma de equipamento elétrico.

A primeira tentativa claramente vitoriosa foi a de Hertz, em 1886. Ele usou uma espira de indução de voltagem para produzir uma descarga elétrica entre duas peças de latão [cobre e zinco] que descrevemos a seguir, em suas próprias palavras: [7]

“Imagine um corpo cilíndrico de latão, de 3 cm de diâmetro e 26 cm de comprimento, interrompido no ponto médio do seu comprimento por um intervalo centelhador e cujos pólos em cada extremidade são formados por esferas de 2 cm de raio”



Figura 4. Rudolph Hertz (1857 – 1894) que verifica a existência das ondas eletromagnéticas, [7] em 1885, e, neste mesmo ano, inicia o estudo do efeito fotoelétrico.

A idéia era que uma vez que a centelha se formasse, ela conectaria eletricamente os dois meio cilindros condutores. A carga elétrica oscilava rapidamente e emitiria uma radiação eletromagnética de comprimento de onda similar ao tamanho dos condutores.

Para se provar que era realmente radiação emitida, ela deveria ser detectada, e Hertz usou um pedaço de fio de cobre de 1 mm de espessura na forma de um anel de diâmetro igual a 7,5 cm. Este anel seria interrompido, formando duas extremidades a uma certa distância uma da outra. Em uma delas, Hertz adicionou a uma das extremidades do anel uma pequena esfera de latão que quase tocava a outra extremidade. Ele também adicionou ao anel um sistema mecânico para controlar esta distância até alguns centésimos de milímetros. [7]

Este “receptor” foi projetado de maneira que uma corrente oscilante presente no anel teria um período de oscilação natural próximo aquele do “transmissor” descrito anteriormente. A presença de cargas oscilantes no anel receptor seria revelada pelo centelhamento entre a ponta do fio e a esfera.

A experiência foi um sucesso. Hertz pôde detectar a radiação mesmo com o receptor a 15 m de distância do transmissor e, por meio de vários experimentos engenhosos ele pôde observar que a radiação era refletida e refratada como esperado e, ainda, que poderia ser polarizada. O principal problema (e o fator mais limitante no experimento) era a possibilidade de se *ver* as centelhas no receptor. Ao tentar melhorar a visibilidade do centelhamento, ele percebeu algo bastante misterioso. Citando Hertz uma vez mais (ele denominava o transmissor de centelhador A e o receptor de centelhador B):

“Por acaso eu decidi envolver o centelhador B em uma caixa escura, para fazer as observações mais facilmente. Ao proceder assim, eu observei que os centelhamentos maiores tornaram-se claramente menores do que no experimento anterior. Ao remover criteriosamente as varias partes da caixa, viu-se que somente à parte da caixa que blindava o centelhador B do centelhador A era a responsável pela redução do centelhamento. Este efeito era observado não só quando à parte da caixa estava bem próxima a B, mas também quando ela estava a grande distancia de B. Um fenômeno assim tão remarcável exigia uma investigação mais detalhada”.

Hertz então iniciou esta investigação. Ele observou que os pequenos centelhamentos do receptor eram mais vigorosos se o receptor fosse exposto à luz ultravioleta emitida a partir do centelhador do transmissor. Ele precisou de bastante tempo para compreender que era a luz ultravioleta responsável pelo fenômeno. Primeiramente ele verificou se algum efeito eletromagnético era o responsável direto, mas esta idéia foi descartada ao perceber que o efeito desaparecia quando se interpunha entre A e B uma placa de vidro. Entretanto, ele percebeu que uma placa de quartzo não eliminava o efeito. Deste modo, ele usou um prisma de quartzo para decompor a luz emitida pelo transmissor B em seu espectro e com esse procedimento, ele descobriu que os comprimentos de onda que produziam os centelhamentos mais intensos era os comprimentos de onda além do visível, na região do ultravioleta. [8]

Em 1887, Hertz concluiu o que deve ter sido fruto de meses de investigação:

“... Eu me limito a comunicar os resultados obtidos, sem tentar apresentar nenhuma teoria e obedecendo a forma na qual os fenômenos observados se apresentaram”.

A experiência de Hallwachs

No ano seguinte, em 1888, outro físico alemão, Wilhelm Hallwachs, em Dresden, escreveu:

“Em publicação recente, Hertz descreveu suas investigações sobre a dependência do tamanho do centelhamento em uma bobina de indução com a radiação recebida a partir de outra bobina centelhadora. Ele mostrou que o fenômeno observado é fruto da ação da luz ultravioleta. Nenhuma outra luz sobre a natureza do fenômeno pode ser considerada devido às condições de pesquisa nas quais ele foi produzido. Eu me esforcei em obter o mesmo fenômeno em condições mais simples e, assim, obter de maneira mais fácil uma explicação para o fenômeno. Obtivemos sucesso ao

investigar a acuada luz elétrica sobre os corpos eletricamente carregados”.



Figura 5. Wilhelm Hallwachs (1859 – 1922). [9]

Ele então descreve seu experimento muito simples: [9] Uma placa polida circular de zinco foi montada sobre um suporte isolante e atada a um eletroscópio folheado a ouro através de um fio. Em seguida, ela foi carregada negativamente. O eletroscópio perdia carga muito lentamente. Entretanto, se a placa de zinco fosse exposta à luz ultravioleta (gerada por uma lâmpada a ar ou por magnésio incandescente), a carga se evanesceu rapidamente. Se a placa fosse carregada positivamente, não havia uma rápida evanescência da carga.

Hallwachs verificou que os metais Rb, K, Na, Li, Mg, Th e Zn, quando são iluminados por luz ultravioleta, apresentam o mesmo fenômeno e, ele não fornecia nenhuma teoria que explicasse o que era observado.

A natureza do fenômeno fotoelétrico

De fato, a situação ficou sem esclarecimentos até 1899, quando Philipp Von Lenard [10] e Joseph John Thomson [11] mostraram que a luz ultravioleta era a responsável pela emissão de elétrons, as mesmas partículas observadas nos raios catódicos. O método era encerrar a superfície metálica a ser exposta à radiação em um tubo de vácuo. Em outras palavras, fazer de catodo do tubo de raios catódicos o metal a ser analisado. A diferença entre as duas configurações é simples. Em vez que os elétrons sejam ejetados devido à ação do forte campo elétrico (comumente empregado no tubo de raios catódicos), os fotoelétrons são ejetados devidos somente à radiação que incide sobre eles.



Figura 6. Philipp Von Lenard (1862 – 1947) [10] e Joseph John Thomson (1856 – 1940) [11].

Nesta época havia uma imagem bastante razoável do que estaria ocorrendo nestes experimentos. Os átomos no catodo contêm elétrons que são forçados a vibrar devido a ação do campo elétrico oscilante que compõe a radiação incidente. Eventualmente alguns deles seriam liberados do átomo e ejetados do catodo.

Consideremos cuidadosamente como a quantidade de elétrons e a velocidade deles deveriam se comportar com a variação de intensidade e da cor da radiação incidente. Ao aumentarmos a intensidade da radiação, deveríamos aumentar os elétrons mais violentamente e, deste modo, deveríamos observar mais elétrons sendo emitidos, em média, com maior velocidade. Aumentando-se a frequência da radiação deveríamos aumentar a vibração dos elétrons mais rapidamente e, assim, deveríamos liberar os elétrons mais rapidamente. Para luz fraca, neste caso, deveríamos esperar algum tempo para que um elétron tenha amplitude de vibração suficiente para se liberar.

Lenard encontra algumas surpresas

Em 1902, Lenard [10] estudou como a energia dos fotoelétrons emitidos variava com a intensidade da luz. Ele usou uma luz de um arco de carbono e aumentando a intensidade da luz milhares de vezes. Os elétrons ejetados incidiam sobre uma placa metálica, o coletor, que estava conectado ao catodo por um fio com um amperímetro bastante sensível, para medir a corrente produzida pela iluminação. Para medir a energia dos elétrons ejetados, Lenard carregou negativamente a placa coletora e, com isso, repeliu os elétrons que se projetam na direção dela. Deste modo, somente elétrons ejetados com energia cinética suficiente para vencer esta diferença de potencial contribuiriam para a fotocorrente observada. Lenard descobriu que havia uma voltagem

mínima bem definida que impedia os elétrons de alcançar o anodo, denominada V_{stop} . Para sua surpresa, ele observou que V_{stop} era independente da intensidade da luz incidente no catodo. Dobrando-se a intensidade luminosa, dobramos o *número* de elétrons emitidos, mas não alteramos a energia de cada um deles. Um campo oscilante mais potente ejetaria mais elétrons, mas a energia máxima dos elétrons emitidos é a mesma que a energia correspondente a um campo mais fraco.

Mas Lenard fez algo mais. Com a sua poderosa lâmpada a arco, havia intensidade suficiente para separar a luz emitida em suas cores e verificar o efeito fotoelétrico usando luz de diferentes cores. Ele observou que a energia máxima dos elétrons emitidos pelo catodo *dependia* da cor da luz incidente (luz de comprimento de onda mais curto ou de maior a frequência emitem elétrons mais energéticos) as medidas da energia não eram muito reprodutíveis porque elas eram extremamente sensíveis as condições materiais da superfície do catodo, em particular às condições de oxidação. No melhor vácuo possível naqueles tempos, um importante processo de oxidação sobre uma superfície limpa ocorria em cerca de dez minutos. [10]



Figura 7. Max Planck (1858 – 1947) [12] e Robert Millikan (1868 – 1953) [13].

Estes fatos foram estabelecidos antes de 1905 e medidas precisas da relação entre a frequência da luz e a energia dos elétrons emitidos foi feita em 1916, quando este tema foi estudado por Robert Andrews Millikan.

O fenômeno de produção de corrente elétrica [13] a partir da iluminação dos eletrodos não é em si surpreendente, pois sabemos que a luz se comporta como radiação eletromagnética e deveríamos esperar, portanto, que o campo elétrico da onda luminosa possa exercer uma força sobre os elétrons da superfície metálica e provocar a emissão de alguns dentre eles. Entretanto, o que foi surpreendente foi encontrar que a energia cinética do elétron emitido é independente da *intensidade* da luz e só depende da *frequência* de forma bastante simples: aumenta linearmente. Se aumentarmos a intensidade da luz, aumentamos unicamente o número de elétrons emitidos por unidade de tempo, mas não aumentamos a energia do elétron. É muito difícil entender isto do ponto de vista clássico, já que deveríamos esperar que quando aumentamos a intensidade da onda luminosa, e por consequência a amplitude do campo elétrico da onda, os elétrons deveriam ser acelerados, alcançando maiores velocidades.

A interpretação de Einstein

A teoria ondulatória da radiação não permite explicar a importância capital da frequência na determinação da energia dos fotoelétrons. Este fato mais tarde parecerá ter ligação com a amplitude do movimento vibratório. Somente em 1905 pode-se dar uma interpretação do efeito fotoelétrico. Na aurora do século XX, para interpretar as leis do “corpo negro”, Max Planck supôs que as trocas de energia entre a matéria e a radiação de frequência f só poderiam se realizar em múltiplos inteiros do quantum elementar de valor:

$$E = hf \quad (1)$$

Einstein foi mais longe. Ele tornou mais precisa a hipótese de Planck e deu uma interpretação bastante simples da experiência de Lenard.

Einstein admitiu que a libertação de cada elétron fotoelétrico se fazia após a absorção, por este, de um corpúsculo de energia luminosa, que chamou de *Licht quantum* e que hoje se denomina *fóton*. A energia de um fóton de luz de frequência f é igual à hf . Deste modo, Einstein restabeleceu, com esta hipótese, uma verdadeira concepção corpuscular da matéria. A energia de cada corpúsculo é ligada a uma frequência e, em consequência, a um fenômeno ondulatório cujas características explicam as interferências.

Se o elétron está a uma certa distância da superfície do material do catodo, uma certa energia U será necessária para extrair o elétron do metal. Admitindo que a energia residual se encontre

inteiramente sob forma cinética, um elétron que sai do metal sob a ação de um fóton de frequência f tem energia:

$$U = hf - U' \quad (2)$$

No interior do metal, os elétrons são animados de movimentos de agitação térmica. Os elétrons mais rápidos, ou seja, os que têm uma energia maior, exigem menos energia para serem extraídos. Denominamos o valor mínimo de U' , W de *trabalho de extração*; então, U será, a energia máxima U_m será:

$$U_m = hf - W \quad (3)$$

A relação de Einstein, como demonstrada em (1), tem as seguintes consequências quantitativas:

- A energia cinética máxima, U_m , de um elétron fotoelétrico é uma função linear da frequência de radiação incidente e a constante de proporcionalidade é igual a h .
- O efeito fotoelétrico só poderá ocorrer, para um dado material, para as radiações de frequências maiores que:

$$f_0 = \frac{W}{h} \quad (4)$$

A frequência f_0 é o *limiar fotoelétrico* do metal considerado. [14]

A experiência de Millikan

A equação do efeito fotoelétrico proposta por Einstein era uma previsão teórica precisa e, como tal, susceptível a verificação experimental quantitativa. Além disso, supondo que as idéias de Einstein estivessem corretas, ela oferecia ainda a oportunidade para novas medidas da constante de Planck. Como já mencionamos, estas questões extremamente importantes foram estudadas por Robert Andrews Millikan em uma série de medidas elegantes e muito cuidadosas, nas quais ele encontrou, para sua surpresa, uma completa concordância com a equação de Einstein quando determinou a constante de Planck com uma incerteza percentual de 0,5%. Citando Millikan: [15]

“O efeito fotoelétrico... materializa, por assim dizer, a quantidade h descoberta por Planck em seu estudo da radiação do corpo negro e, como nenhum outro fenômeno, nos faz acreditar que o conceito físico básico que está por trás do trabalho de Planck corresponde à realidade”.

Em sua experiência, Millikan incidiu luz monocromática sobre uma superfície metálica, geralmente em um metal alcalino (fotocatodo), e com isso, provoca a emissão de fotoelétrons. Um eletrodo coletor, que se pode manter a um potencial arbitrário $-V$ em relação ao fotocatodo, foi colocado próximo ao fotocatodo e mediu-se uma corrente de fotoelétrons. Se supusermos agora que todos os elétrons são emitidos com a mesma energia cinética K , dada pela equação (1), é evidente que nenhum deles poderá alcançar o eletrodo coletor se $eV > K$. Por consequência, podemos observar a corrente em função do potencial de retardo V e se V_0 é o menor valor do potencial para o qual a corrente se anula, teremos pela equação (3) e sabendo que $U_m = eV_0$:

$$eV_0 = hf - W \quad (5)$$

e finalmente:

$$V_0 = \frac{h}{e} f - \frac{W}{e} \quad (6)$$

Um gráfico [4] do valor de corte do *potencial limite* V_0 em função da frequência f será, portanto, uma reta, como mostra a fig. 8 copiada do trabalho de Millikan. A inclinação desta reta permite determinar a constante h/e e a interseção dela com o eixo dos V_0 nos dá W/e , o que permite determinar a constante do material W .

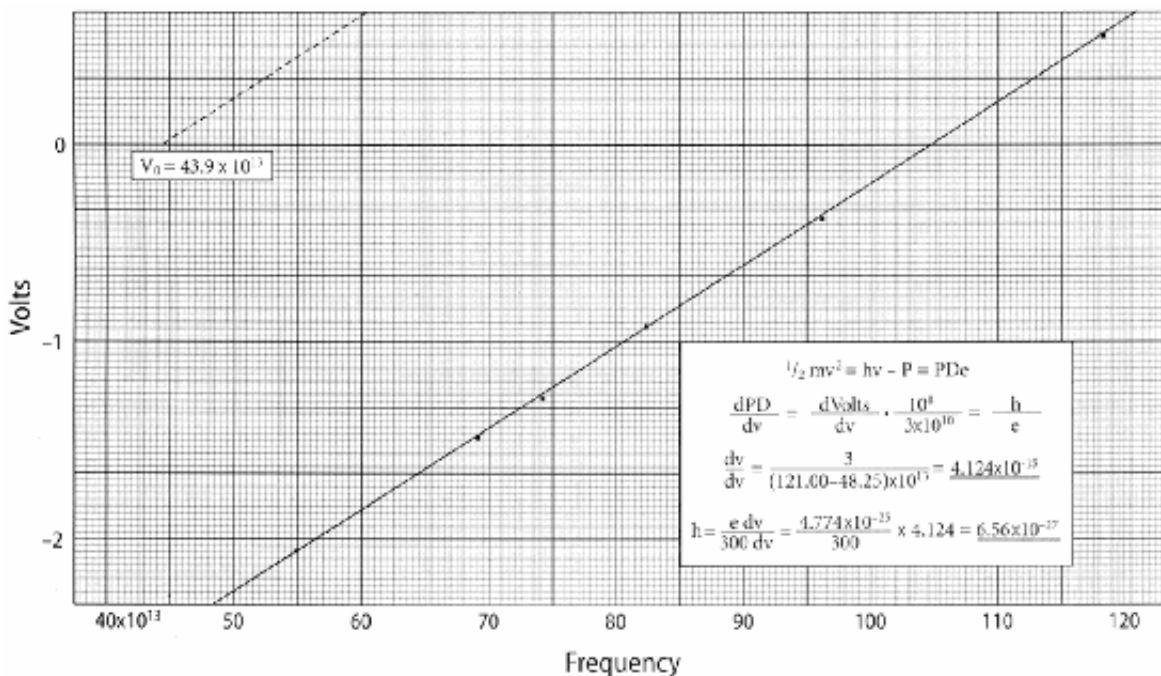


Figura 8. Resultados da experiência de Millikan, tirada da p. 373 do artigo original de Millikan, [15]. Podemos observar dois pontos interessantes nesta figura: (i) como os pontos experimentais desviam muito pouco de uma relação linear e a falta de atenção da parte de Millikan na representação das unidades das grandezas físicas calculadas.

Este é um experimento claro e conceitualmente simples, mas requer um cuidado considerável para se obter resultados precisos e reprodutíveis.

Um valor atual de h , deduzido de diversas experiências, é:

$$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$$

e a função trabalho, para o sódio, é $2,28 \text{ eV}$. Para a maioria dos metais o valor a função trabalho é da ordem de poucos elétrons-volt.

Em 1921, Einstein recebeu o prêmio Nobel por ter previsto teoricamente a lei do efeito fotoelétrico. Antes que Millikan validasse experimentalmente essa lei em 1914, Einstein foi indicado para membro da Academia Prussiana de Ciências por Planck e outros. A atitude negativa inicial perante a hipótese do fóton é revelada por eles em uma declaração, elogiando Einstein, no qual relatam:

“Em resumo, podemos dizer que dificilmente haverá um grande problema, dos quais física moderna é tão rica, ao qual Einstein não tenha dado uma contribuição importante. Que ele tenha algumas vezes errado o alvo de suas especulações como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz (fótons), não pode ser realmente colocado contra ele, pois é impossível introduzir idéias fundamentalmente novas, mesmo nas ciências exatas, sem ocasionalmente correr um risco”.

Hoje a hipótese do fóton é usada em todo o espectro eletromagnético, não apenas na região visível. Evidentemente, para ondas de frequências muito pequenas, em torno de 10^{15} Hz , a energia associada ao fóton não será suficiente para ejetar fotoelétrons de superfícies metálicas, uma vez que se essa energia fornecida pelo fóton for maior do que a função trabalho necessária para o elétron abandonar o material haverá ejeção de fotoelétrons de superfícies metálicas.

4. Diodos emissores de luz — LEDS

Diodos emissores de luz ou LEDS, acrônimo de *Light Emitting Diode*, são os reais heróis do mundo eletrônico contemporâneo. Eles fazem dezenas de diferentes tarefas em nosso cotidiano e são encontrados nos mais diferentes tipos de dispositivos eletrônicos. Entre outras coisas, eles fazem parte de relógios digitais, transmitem informação por controle remoto, e nos indicam quando os aparelhos eletrônicos estão em operação. Podem ser arrumados para criar imagens ou controlar o tráfego como sinalizadores.

Basicamente, os LEDS são pequenas lâmpadas que podem ser encaixadas facilmente em circuitos eletrônicos. Mas, diferentemente das lâmpadas incandescentes, eles não possuem um filamento que é aquecido e eles não se aquecem enormemente em relação ao ambiente. Eles emitem luz somente devido ao movimento dos elétrons no material semicondutor, e estes têm uma durabilidade comparável aos diodos tradicionais. Neste capítulo iremos tratar sobre os princípios elétricos que descrevem o comportamento destas diminutas lâmpadas.

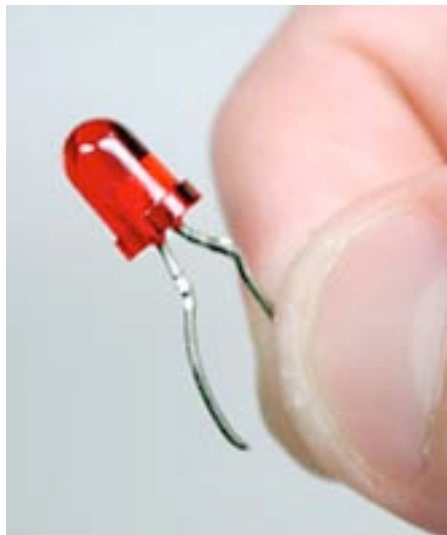


Figura 9. Esta figura ilustra um LED de uso comum utilizado em computadores, controles remotos, rádios e outros aparelhos eletrônicos.
[15]

O que é um diodo?

Quando estudamos as propriedades elétricas dos materiais, os classificamos em: *isolantes*, aqueles que apresentam uma condutividade elétrica praticamente nula; *condutores*, aqueles que têm uma condutividade elétrica bastante elevada; e os *semicondutores*, aqueles materiais que apresentam uma condutividade elétrica intermediária entre os isolantes e os condutores.

Diodo é o dispositivo eletrônico mais simples possível feito a partir de um material ligeiramente condutor ou semicondutor que recebeu impurezas (átomos de um outro material semicondutor). Este processo é denominado *dopagem*. Os diodos exibem características úteis tais como: funcionar como um interruptor controlado pela tensão que é aplicada aos seus terminais, como retificadores de tensão (deixam fluir a corrente num único sentido), verificar se há passagem de corrente num certo ponto de algum circuito (diodo LED) que emitem luz numa variedade de cores quando são atravessadas por uma corrente e para regular voltagens (diodo Zener). Existem ainda outros tipos de diodos tais como o fotodiodo, que é o inverso do LED, o diodo Schottky e o diodo Varactor.

Semicondutores

Os dois semicondutores de maior importância na eletrônica são o silício e o germânio. Estes elementos estão localizados na quarta coluna da tabela periódica e apresentam quatro elétrons de valência. A estrutura cristalina do silício ou do germânio segue um padrão tetraédrico com cada átomo partilhando um elétron de valência com cada um dos quatro outros átomos vizinhos. Para temperaturas próximas do zero absoluto, os elétrons nas camadas mais externas estão fortemente ligados ao núcleo atômico, não existem elétrons livres e o silício é um isolante.

Quando os átomos não estão isolados, mas juntos em um material sólido, as forças de interação entre os mesmos são significativas. Isso provoca uma alteração nos níveis de energia acima da valência. Podem existir níveis de energia não permitidos, logo acima da valência. [16]

Para que um material conduza eletricidade, é necessário que os elétrons de valência, sob ação de um potencial elétrico aplicado, saltem do nível de valência para um nível ou banda de condução.

Conforme a Fig 10, em um material condutor não existem níveis ou banda de energia proibida entre a condução e a valência e, portanto, a corrente flui facilmente sob a ação do campo elétrico. Já um material isolante tem uma larga banda proibida entre a valência e condução. E dificilmente haverá condução da corrente.

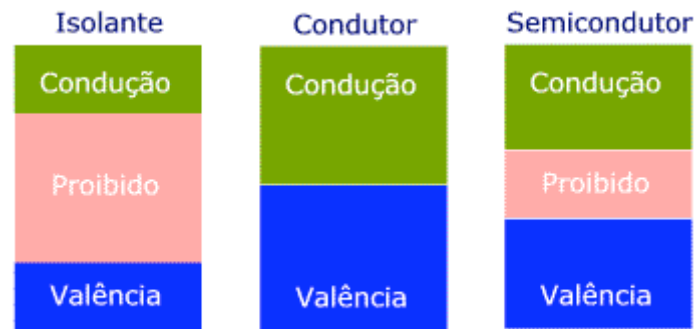


Figura 10. Esta figura ilustra a diferença entre paradigmas de energia para materiais condutores, semicondutores e isolantes. [17]

Os semicondutores possuem bandas proibidas com larguras intermediárias. Isto significa que podem apresentar alguma condução, melhor que os isolantes, mas pior que os condutores.

A energia necessária para quebrar uma ligação covalente é de cerca de 1 eV para o silício e de $0,7\text{ eV}$ para o germânio. Na temperatura ambiente (300 K), alguns elétrons são excitados para a banda de condução destes elementos, tornando-se elétrons livres. As regiões no material da qual os elétrons foram excitados tornam-se regiões com um excesso de carga positiva, e as regiões do material para a qual os elétrons excitados migraram, tornam-se regiões com um excesso de carga negativa. Deste modo, sob a ação de um campo elétrico, a condutividade do semicondutor será caracterizada pelo fluxo de cargas positivas e negativas ao longo do material.

Semicondutores dopados

O efeito de dopagem pode ser ilustrado adicionando-se ao germânio ou ao silício alguma impureza constituída pelos elementos vizinhos, pertencentes à terceira ou a quinta coluna da tabela periódica (ver Tabela 1). Por exemplo, se adicionarmos *Fosfor* (um elemento pentavalente) ao silício, a carga iônica efetiva será de $+5e$. Quando o átomo pentavalente se arranja na estrutura cristalina com o silício, somente quatro elétrons são partilhados com os átomos vizinhos. Deste modo, o quinto elétron fica disponível para condução e produzimos um material tipo n , ou seja, quando em um cristal de silício é acrescentada como impureza, uma quantidade de átomos de um material pentavalente, como o citado anteriormente, tem-se um elétron adicional que fica sem participar das ligações, tornando-se um elétron livre (ver fig 11a). Desta forma os elétrons livres são portadores majoritários e os buracos são portadores minoritários. Se, ao contrário, uma quantidade

de átomos de um material como o *Antimônio* (um elemento trivalente) adicionarmos ao silício, as ligações covalentes formam lacunas. Desta forma os buracos são portadores majoritários e os elétrons livres são portadores minoritários, logo é produzido um material tipo *p* (ver fig 11b).

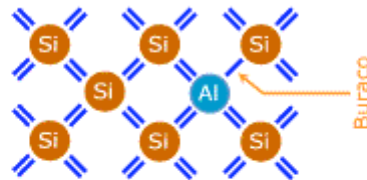


Fig. A

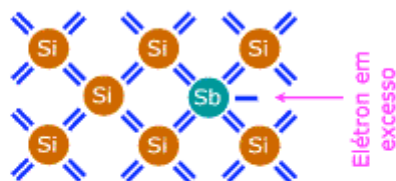


Fig. B

Figura 11. Tanto a figura A quanto a figura B ilustra quando um material semiconductor é adicionado de impurezas e suas propriedades elétricas são radicalmente modificadas. [17]

É possível introduzir em diversas regiões de um mesmo material semiconductor diferentes tipos de impurezas, podendo existir regiões de semiconductor tipo próximas a regiões de semiconductor tipo n . A transição de uma região p para outra região n é denominada junção pn . O excesso de elétrons do material tipo n tende a migrar para o material tipo p acarretando uma “recombinação elétron-buraco”.

À medida que os átomos [17] do material tipo p próximos à junção recebem elétrons preenchendo suas lacunas, no lado n forma-se uma região de íons positivos (falta de elétrons) e no lado p uma região de íons negativos (excesso de elétrons), dificultando a passagem de elétrons do material tipo n para o material do tipo p . Quando o equilíbrio é alcançado, passa a existir uma barreira de potencial V_0 na junção do semiconductor (ver fig 12). Assim, a polaridade da barreira de potencial mantém os elétrons na parte n e os buracos na parte p (Fig 12 A). Se um potencial externo $V > V_0$ for aplicado (Fig 12 B), o potencial de barreira será quebrado e a corrente elevada, pois existem muitos elétrons em N. Diz-se então que a junção está diretamente polarizada. No caso de inversamente polarizada, (Fig 12 C), o potencial de barreira será aumentado, impedindo ainda mais a passagem de elétrons e a corrente será pequena.

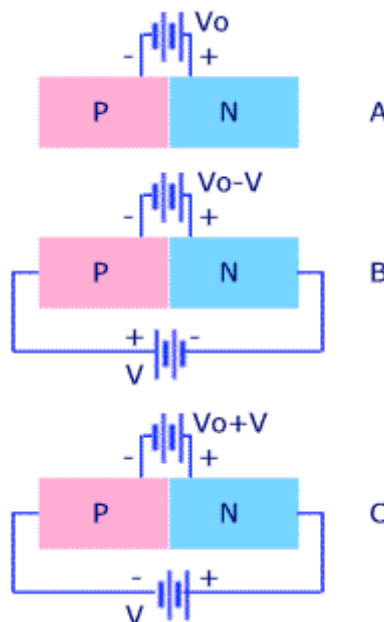


Figura 12. Esta figura ilustra um semiconductor tipo n colocado junto a um do tipo p . Na região de contato, chamada junção, haverá a formação de uma barreira de potencial. [17]

Tabela 1. Elementos semicondutores na tabela periódica.

III		IV		V	
5	Boro 10.82	6	Carbono 12.01	7	Nitrogênio 14.008
13	Alumínio 26.97	14	Silício 28.09	15	Fósforo 31.02
31	Gálio 69.72	32	Germânio 72.60	33	Arsênio 74.91
49	Índio 114.8	50	Estanho 118.7	51	Antimônio 121.8

Um diodo é composto de uma seção de um material tipo n ligada a uma seção feita de material tipo p , com eletrodos nos extremos. Este arranjo conduz eletricidade em somente uma direção. Quando nenhuma voltagem é aplicada ao diodo, elétrons do material tipo n preenchem os buracos do material tipo p ao longo da junção entre as camadas, formando uma zona de *depleção*. Nesta zona, o material semicondutor retorna ao seu estado isolante original. Todos os buracos estão ocupados e, assim, não existem elétrons livres ou espaços vazios a serem ocupados pelos elétrons. Deste modo, não pode haver um fluxo de cargas e, por consequência, nenhuma corrente elétrica pode fluir no diodo.

Comportamento geral dos diodos

Os cálculos para definir o comportamento da corrente elétrica em um diodo [16] de junção pn normalmente é feita a partir de uma análise detalhada do gradiente dos portadores de carga na região de transição. Para nossos propósitos, podemos admitir que a corrente no diodo é feita a partir das contribuições da corrente de injeção I_D (corrente dada ao diodo) que depende da diferença de potencial V_D no diodo, e da corrente de saturação I_S (corrente dependente da temperatura), que é independente de V_D . A corrente de injeção I_D é determinada a partir da probabilidade estatística da distribuição dos elétrons e buracos pelos níveis de energia disponíveis no semicondutor. Para uma diferença de potencial positiva V , esta probabilidade aumenta e pode ser dada pela distribuição de Boltzmann:

$$e^{-e(V - V_0)/KT} = e^{-eV_0/KT} e^{eV/KT} \quad (1)$$

Substituindo $e^{eV_0/KT}$ por A_1 , podemos escrever a corrente de injeção I_D :

$$I_D = A_1 e^{eV_d/KT} \quad (2)$$

Para uma dada temperatura, a corrente de injeção I_D será da forma:

$$A_1 A_2 e^{eV_d/KT} = A e^{eV_d/KT} \quad (3)$$

onde A_2 é uma constante que tem dimensão de corrente e a corrente reversa é um valor praticamente constante e igual a I_S (corrente de saturação). Com isso a corrente total é dada por:

$$I_T = I_D - I_S = A e^{eV_d/KT} - I_S \quad (4)$$

Quando $V = 0$,

$$I_T = 0 = A e^0 - I_S :: A_1 A_2 = I_S \quad (5)$$

Desta forma, então, a corrente no diodo será:

$$I = I_S (e^{eV_d/KT} - 1) \quad (6)$$

Na temperatura ambiente, $T = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$, $e/kT = 40\text{ V}^{-1}$, $I_S = 10\text{ nA}$.

A equação (6) é uma boa aproximação para diodos de germânio, mas não tão boa para diodos de silício. Para diodos de silício, a corrente se comporta segundo a função:

$$I = I_S e^{eV/\eta T} - I_S, \quad (7)$$

onde η é aproximadamente igual a 2.

Como pode o diodo emitir luz?

O modelo atômico de Bohr revela que, em um átomo, os elétrons movem-se em orbitais ao redor do núcleo atômico, e elétrons em diferentes orbitais possuem diferentes energias. Os orbitais de maior energia são aqueles mais distantes do núcleo atômico. Para um elétron saltar de um orbital interior para um orbital mais externo, ele precisa receber energia por meio de algum processo físico. Inversamente, o elétron perderá energia quando saltar do orbital mais externo para um orbital mais interno.

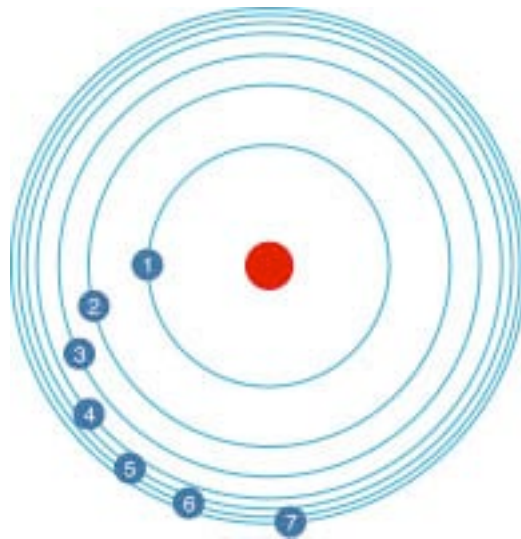


Figura 13. Esta figura representa os sete níveis de energia possíveis. [17]

A criação de pares de elétron-buraco é o processo reversível através do qual os elétrons podem ocupar os diferentes orbitais atômicos. Como vimos na Seção anterior, os elétrons livres, que se movem através do diodo, podem ocupar um buraco da camada tipo *p*. Este processo envolve a queda do elétron da banda de condução (orbital mais externo) para um orbital inferior. Deste modo, energia é liberada quando um elétron se recombina com um buraco. Esta energia é liberada na forma de onda eletromagnética monocromática ou fóton. Quanto maior a variação de energia do elétron ao saltar de orbitais, maior será a energia do fóton produzido. Como a energia do fóton é caracterizada pela sua frequência, a onda eletromagnética monocromática emitida fóton terá a mesma frequência do fóton.

Este processo ocorre em qualquer diodo, mas somente podemos ver os fótons quando o diodo é composto de um material particular que permite que esses fótons emitidos tenham uma frequência no espectro visível. Os átomos em um diodo de silício, por exemplo, estão arranjados de tal forma que só os níveis orbitais eletrônicos muito próximos é que são usados pelos elétrons no processo de recombinação com os buracos. Devido à proximidade dos orbitais, a frequência dos fótons produzidos é tão baixa que eles, os fótons, são invisíveis ao olho humano – eles estão na região do infravermelho do espectro eletromagnético.

No caso dos *LEDs*, a combinação dos materiais é tipicamente alumínio-gálio-arsênio (AlGaAs). Neste arranjo atômico, todas as ligações são feitas perfeitamente entre os átomos vizinhos, não havendo nenhum elétron livre para conduzir a corrente elétrica. No material dopado, os átomos extras desequilibram o valor da carga elétrica, ou adicionando elétrons ou criando buracos que permitem o fluxo de elétrons. Tanto uma configuração quanto a outra tornam o material mais condutor.

5. Medindo a constante de Planck usando um LED

Os LEDs estão disponíveis comercialmente desde os anos 60. Durante a sua história de mais de 40 anos, o custo desses dispositivos caiu drasticamente e hoje em dia eles são encontrados facilmente em qualquer loja de dispositivos eletrônicos por preços da ordem de R\$1,00. Eles são encontrados facilmente em três cores: vermelho, amarelo e verde, mas hoje em dia podemos encontrar LEDs em quase todas as cores do espectro visível, partindo do infravermelho até o azul.

A estrutura de um LED típico está representada na Fig 14. A luz é emitida a partir da parte superior da junção (cor verde na figura). A haste fina conduz a corrente para a superfície superior da junção sem bloquear a luz produzida. O invólucro de plástico pode ser transparente, o que permite ver os componentes internos sem dificuldades, ou colorido o que amplia o efeito sobre a cor da luz emitida.

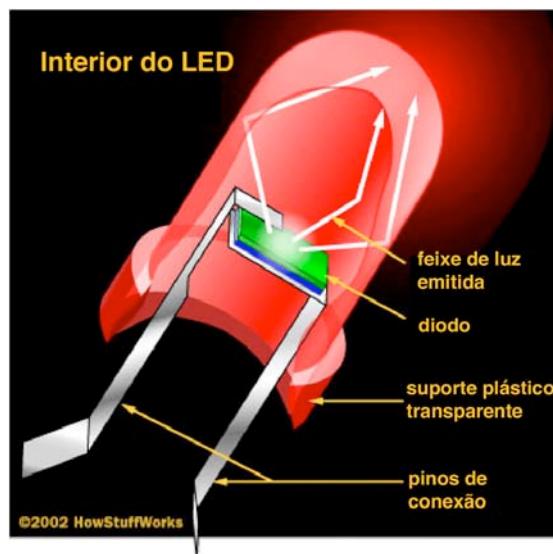


Figura 14. Observa-se, nesta figura, a estrutura interna típica do interior de um LED. [19]

LEDs exigem somente alguns volts para funcionarem e, assim, podem ser empregados em diferentes demonstrações em física. De fato, vários autores têm sugerido diferentes experimentos tais como medida da intensidade da luz, correntes induzidas e física moderna. Agora, seguindo alguns autores, iremos descrever como empregar o LED na determinação da constante de Planck.

Para determinarmos a constante de Planck [20] experimentalmente, será necessário medir a energia do fóton de frequência conhecida. Existem duas maneiras de realizar esta medida. Ou medimos a energia recebida pelo material quando ele é iluminado por um fóton ou medimos a

energia perdida pelo material quando o fóton é produzido. A experiência do efeito fotoelétrico cai na primeira categoria e a segunda categoria é denominada de efeito fotoelétrico inverso.

Medida da curva característica de um LED.

Uma introdução às características do diodo deve começar revelando-se que eles são dispositivos eletricamente direcionais. Quando são conectados a uma fonte de tensão contínua (DC) de forma correta (forward biased), o diodo se iluminará, enquanto que nada ocorrerá se ele for conectado de forma invertida (reverse biased). Uma vez que os estudantes se familiarizarem com o comportamento unidirecional do diodo, estaremos aptos a avançar com o experimento.

Objetivos

Nesta experiência objetiva-se que o aluno possa conhecer o comportamento da corrente elétrica em função da voltagem sobre um diodo, utilizando um método simples, de baixo custo e bastante acurado. Sabe-se que para valores de voltagem inferiores a uma voltagem crítica o LED não se iluminará ou produzirá uma iluminação muito fraca e, neste experimento o aluno será capaz de determinar este valor de V_d .

Descrição dos aparatos

O custo dos componentes eletrônicos necessários para a realização do experimento é inferior a R\$ 100, 00, e a construção dos aparatos poderia ser realizada pelos próprios alunos, devido à simplicidade dos circuitos eletrônicos envolvidos na experiência. A acurácia e a precisão dos resultados dependerão somente da qualidade dos voltímetros utilizados na experiência e da habilidade do experimentador, onde se utilizados equipamentos de medição de alta fidelidade, os resultados poderiam ser comparados aos obtidos em laboratórios profissionais.

Caso esta experiência seja realizada em um curso superior de engenharia ou de física, ou ainda numa escola secundária com formação técnica em eletrônica ou eletrotécnica, o circuito poderia ser montado pelos próprios alunos, assim como a confecção de uma placa de circuito impresso (PCI) para fazer as conexões elétricas entre os componentes. Os LEDs usados no experimento são razoavelmente parecidos com os ilustrados (Figura 15). Também resistências de diferentes valores foram utilizados e finalmente um Pront-Board com a placa de conexão idêntica a descrita abaixo. Foram usadas as cores descritas abaixo:

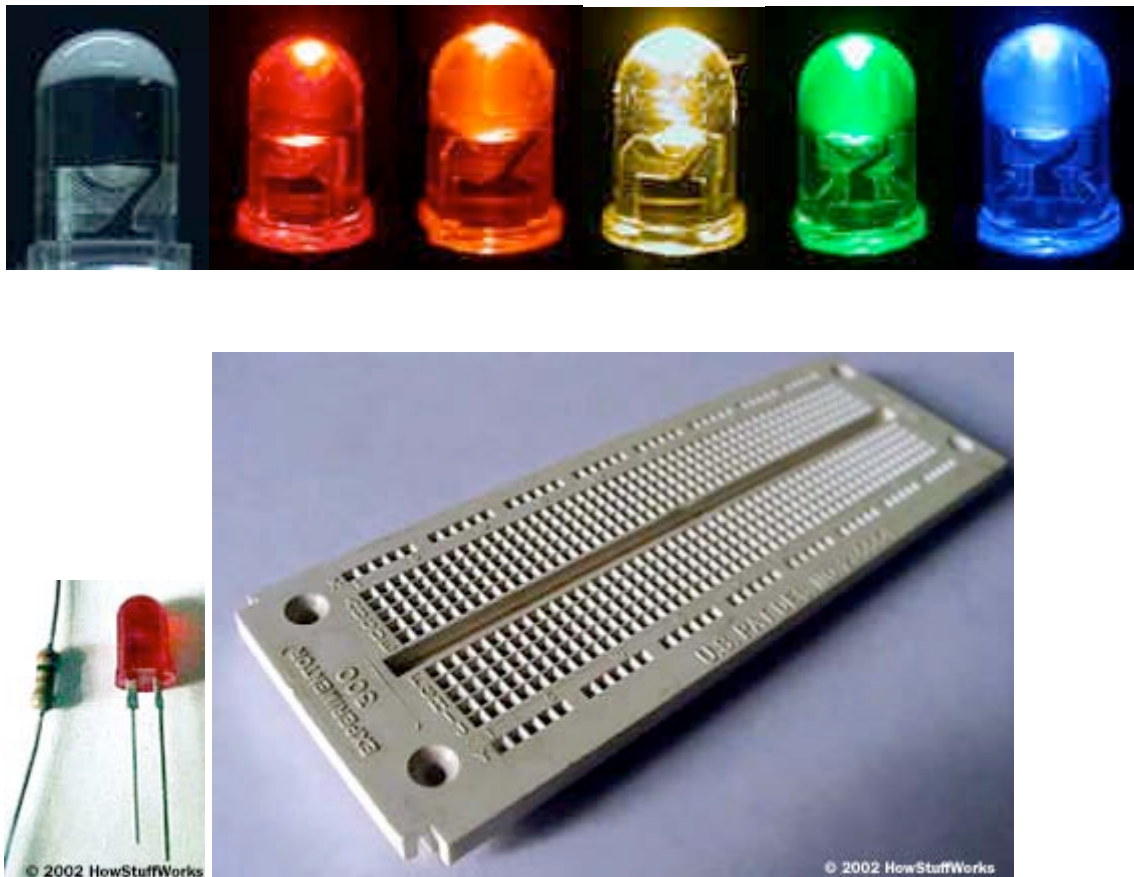


Figura 15. Aparatos usados na experiência. Todo esse material é de fácil acesso e simples manuseio para o aluno e razoavelmente barato. Na figura representamos, da esquerda para a direita, os LEDS do infravermelho, do vermelho, do laranja, do amarelo, do verde e do azul. [19]

Procedimento experimental

Com o objetivo de determinar a constante de Planck, podemos inicialmente fazer o levantamento da curva característica dos LEDS que serão utilizados, através do circuito elétrico representado na figura 16:

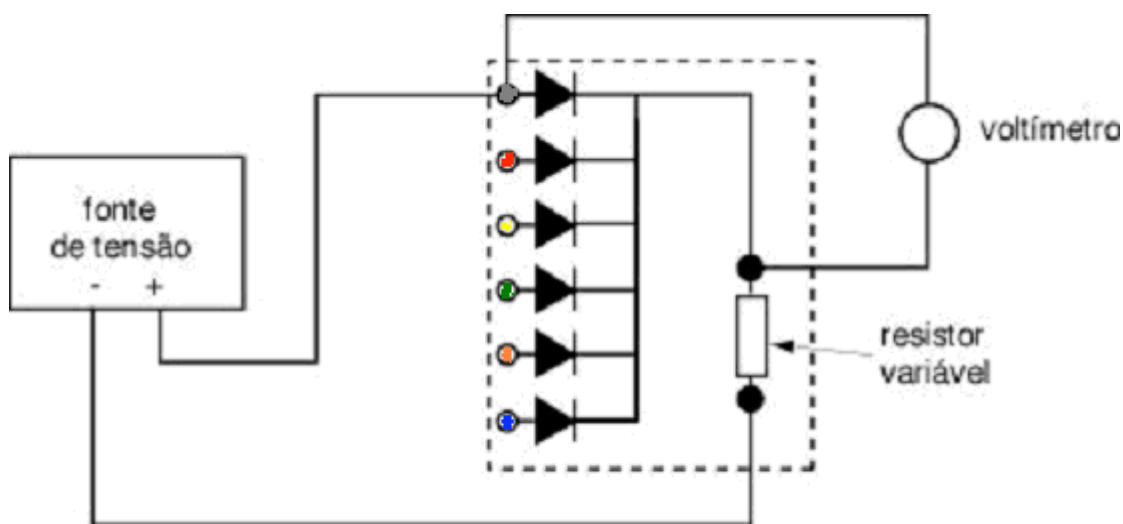


Figura 16. Circuito elétrico esquemático semelhante ao do experimento ilustrando as cores dos LEDS usados. A tensão de operação foi de 14,95 Volts e as resistências variavam de 0,395K até 47,80K, sendo as voltagens medidas no LED e nas resistências.

A figura 17 apresenta as curvas características de corrente em função da voltagem no diodo para os LEDS infravermelho, vermelho, laranja, amarelo, verde e azul, respectivamente. Observa-se na figura que a corrente só varia significativamente a partir de uma determinada tensão, denominada tensão limiar. Isto significa que luz é emitida somente quando a diferença de energia entre dois estados eletrônicos em um diodo é grande o bastante para que a transição do elétron libere um fóton do comprimento de onda correspondente do diodo emissor de luz. Quando o diodo é submetido a voltagens maiores que essa voltagem de limiar, observa-se que a corrente no diodo varia significativamente para pequenas variações da tensão no diodo e que a luz emitida por estes se torna bastante intensa.

É interessante notar que o LED laranja empregado no nosso experimento também começa a emitir luz a partir de uma determinada voltagem entre os LEDS de cor vermelha e amarela, mas a sua curva característica não acompanha a curva característica destes LEDS nem dos outros LEDS de comprimentos de onda maiores. Não determinamos a razão para tal comportamento, mas essa característica deste LED não compromete a análise para a determinação da constante de Planck.

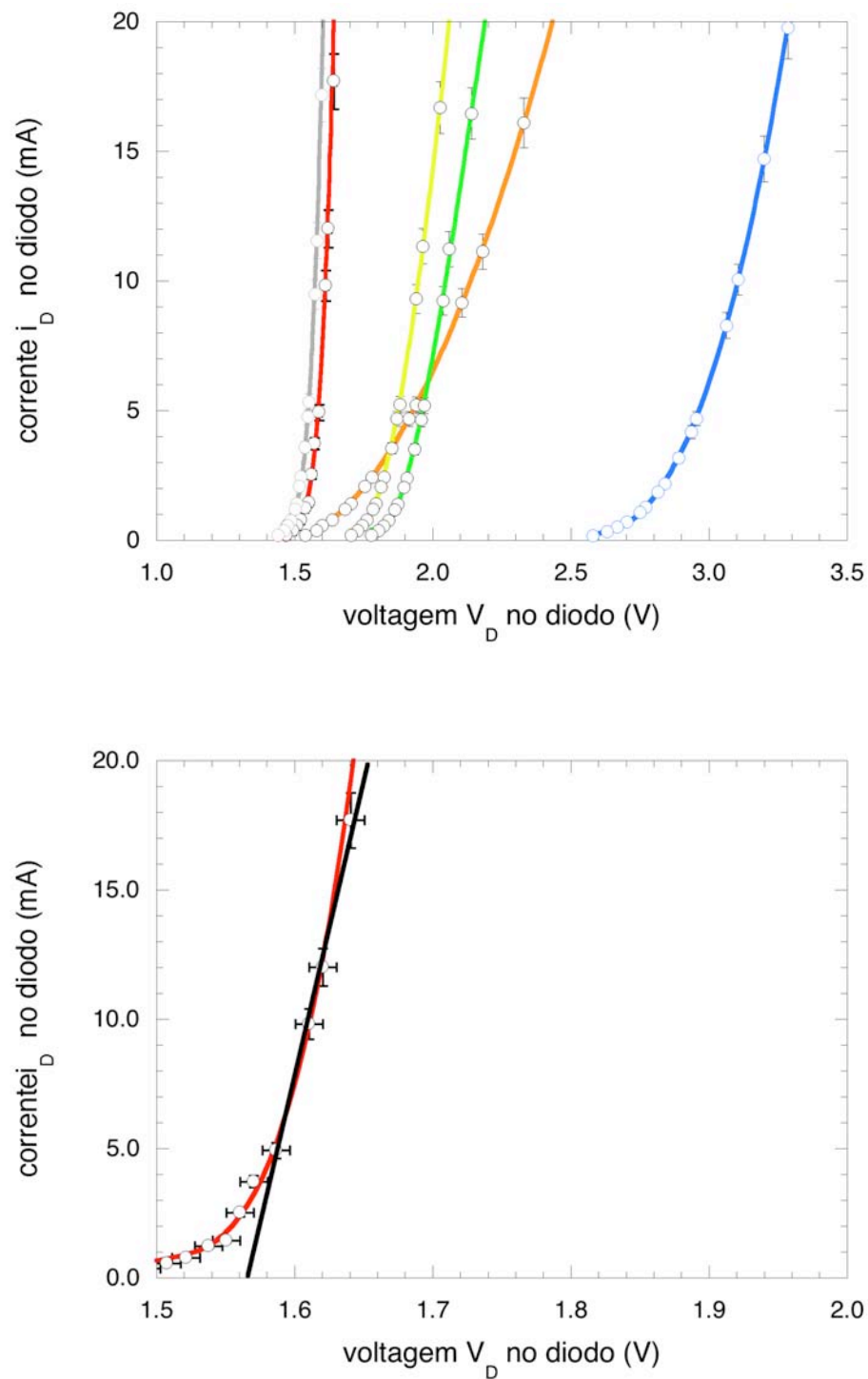


Figura 17. O gráfico superior da figura representa a curva característica de cada um dos diferentes LEDS empregados no experimento. O gráfico inferior da figura representa a determinação da tensão limiar para cada um dos cinco LEDS. O valor exato da tensão é determinado com uma reta colocada nos pontos superiores da curva de cada LED, na região em que o LED emite luz. A interseção desta reta tangente com o eixo das ordenadas define o valor da tensão limiar, ou seja, quando o LED começa a acender.

Resultados

Os recursos apresentados neste trabalho consistem basicamente na realização de um experimento simples que nos permite observar o efeito fotoelétrico na sua forma inversa, ou seja, emissão de luz monocromática, e por consequência, determinar constante de Planck. Neste processo, a constante de Planck é obtida a partir do valor de tensão necessária para acender um LED de uma cor qualquer.

Observamos, ainda, a partir da figura 17, que esta tensão de limiar aumenta conforme a cor da luz emitida pelo LED e é inevitável se perguntar se essas duas grandezas físicas não estariam correlacionadas. Para verificarmos se havia a correlação e, se houvesse, qual seria a sua forma funcional, construímos a figura 18.

Na figura 14, obtivemos a reta obtida a partir das medidas da voltagem limiar V_d pela frequência da luz do LED f (10^4 Hz). Para caracterizar as cores dos diferentes LEDs, emprega-se o valor do comprimento de onda λ associada à luz emitida pelo LED em uma dada frequência f , onde ($f = c/\lambda$, e c é a velocidade da luz no meio em que ela se propaga). O erro associado às medidas de voltagem se refere à incerteza do aparelho utilizado na medição.

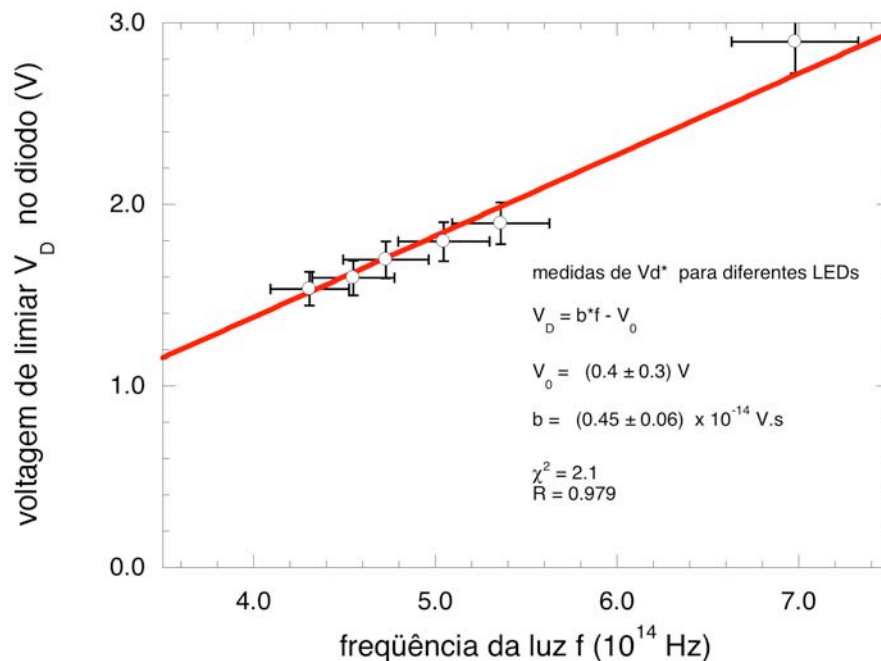


Figura 18. Reta que representa a relação linear entre o potencial crítico e a frequência de luz. Baseado nesta figura calculamos a constante de Planck.

Os valores dos comprimentos de onda utilizados no cálculo da frequência característica do LED de uma determinada cor foram os valores fornecidos pelos fabricantes [22] dos LEDS, apresentados na tabela 2:

Tabela 2. Comprimentos de onda utilizados no experimento.

Cores	Comprimento de onda (nm \pm 5%)	Frequência (10¹⁴ Hz)	Voltagem de limiar (V)
Infravermelho	697	4.3 \pm 0.2	1.54 \pm 0.05
Vermelho	660	4.5 \pm 0.2	1.60 \pm 0.1
Laranja	635	4.7 \pm 0.2	1.70 \pm 0.1
Amarelo	595	5.0 \pm 0.2	1.80 \pm 0.1
Verde	560	5.4 \pm 0.3	1.90 \pm 0.1
Azul	430	7.0 \pm 0.4	2.90 \pm 0.2

Sabemos que a equação da reta é da forma:

$$Y = bx + a. \quad (8)$$

Portanto, a partir do gráfico da figura 14, podemos concluir que a voltagem de limiar V_d é uma função linear da frequência da luz emitida pelo LED:

$$V_d = bf + a.$$

Deste modo, na ausência de luz ($f = 0$), cada elétron participante da corrente elétrica recebe, da bateria, uma energia igual a:

$$eV_d = ea = -eV_0,$$

onde e é a carga eletrônica. Com isso, podemos dizer que, na presença de luz ($f \neq 0$) a energia cedida pela bateria aos n elétrons se converte em energia luminosa,

$$neV_d + neV_0 = nebf$$

e essa energia luminosa depende da frequência f . Observando o lado direito da equação acima podemos perceber que essa energia luminosa corresponde a n vezes uma quantidade fundamental E_f , denominada quantum de luz ou energia de um fóton. Portanto, podemos escrever que a energia de um fóton é proporcional à frequência da luz associada a ele:

$$E_f = ebf \quad (9)$$

Ou, de forma mais simplificada,

$$E_f = hf \quad (10)$$

onde, substituímos o produto das duas constantes e e b por uma nova constante h , denominada constante de Planck:

$$h = eb = \text{cte} \quad (11)$$

Pelo gráfico, a constante b corresponde ao coeficiente angular encontrado:

$$b = (0.45 \pm 0,06) \times 10^{-14} \text{ Vs}$$

e sabemos também que o valor da carga eletrônica é igual a $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$. Portanto, experimentalmente encontramos o valor da constante utilizando a equação (10):

$$h = (7.20 \pm 0,04) \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Podemos, ainda, reescrever a constante h em elétron-Volts:

$$h = 4.5 \times 10^{-15} \text{ eV}.$$

O valor tabelado da constante de Planck é de $6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$. A discrepância achada entre os valores foi de 13.4% que está consistente com o erro relativo (13.3%) do coeficiente angular da figura 18.

Os valores do comprimento de onda utilizados nessa experiência foram tabelados. Mas foi tentada a reprodução idêntica do método experimental utilizado por Marisa Almeida Cavalcanti e Cristiane Tavolaro em seu livro “Física Moderna Experimental” [20] para o cálculo do comprimento de onda. Para a determinação desses comprimentos de ondas dos LEDS e por consequência da frequência da radiação emitida pelo LED, as autoras recomendavam a utilização de uma rede de difração convencional ou um CD transparente. Cavalcanti e Tavolaro sugerem uma técnica através do qual os comprimentos de onda são obtidos usando uma rede difração para decompor a luz e uma câmara fotográfica digital de alta resolução para registro de imagem. Foram encontradas várias dificuldades para a reprodução sugerida pelas autoras. Uma das dificuldades foi o uso dos LEDS para a determinação dos máximos de difração. A intensidade luminosa dos LEDS não atravessava a rede de difração, que foi tentada inúmera vezes sem sucesso. Isto é, inúmeras dificuldades foram encontradas e o método apresentado pelas autoras não pôde ser reproduzido.

Conclusões

O fenômeno do efeito fotoelétrico pode ser utilizado como uma ferramenta poderosa na prática pedagógica de um professor, sendo capaz de influenciar positivamente na formação intelectual e cognitiva do aluno, abrindo novas portas para os estudantes e mostrando que ainda há muito para se descobrir e se desenvolver no meio científico.

O experimento sugerido mostrou estar em acordo com as exigências de um laboratório didático devido a vários fatores. Entre eles temos:

- o baixo custo empregado para o desenvolvimento da experiência;
- o tempo gasto com a coleta de dados é relativamente pequeno (cerca de uma hora);
- que fenômenos complexos podem ser apresentados para os alunos de uma forma simples, evitando formalismos matemáticos;
- desenvolve-se nos alunos o raciocínio crítico necessário para uma formação ampla e completa;
- introduz um assunto moderno e de muitas aplicações tecnológicas de uma forma simples e que possibilita a compreensão de todos;
- leva para a sala de aula a Física como uma ciência de caráter experimental;

Os valores para a constante de Planck, embora limitados pela técnica utilizada, ainda estão distantes do ideal. A presença do LED de cor azul foi de suma importância para o valor da constante de Planck, pois como sua cor está mais afastada do infravermelho os valores de voltagem limiar fizeram com que a discrepância do valor da constante diminuí-se relevantemente dando maior credibilidade para o seu cálculo. No entanto, há de se considerar que obtemos a mesma ordem de grandeza correta, fundamental para o aluno. É relevante que o aluno do Ensino Médio execute um experimento tecnicamente simples, porém rico em conceitos e aplicações tecnológicas. Com esta atitude contribuímos muito para desmistificar o papel de constantes físicas, que muitas vezes parecem surgir por magia.

Outro ponto de registro é a proposta de interdisciplinaridade [21] entre professores de Matemática e Física, apontando alternativas para uma prática docente interligada e contextualizada. O processo histórico envolvendo o fenômeno cria grande expectativa e desperta o interesse do aluno para com a disciplina, eliminando de vez o estigma “disciplina chata”.

Por fim, o tema tem uma riqueza extraordinária de conteúdo e abordagens que desperta a curiosidade do aluno em fenômenos luminosos presentes em seu cotidiano. Talvez por esta razão, que este assunto seja uma fonte inesgotável de diferentes propostas educacionais visando o aprendizado dinâmico, instrutivo, tecnológico e aplicado, entendendo-se assim como mais uma contribuição para com nossos colegas que vai nos possibilitar adequarmos nosso planejamento de curso em uma visão mais integrada e contextualizada de Ensino.

Referências

- [1] Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM).
- [2] Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – 9.394/96 (LDB).
- [3] M. Rouault, Física Atômica, Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1959, Cap. 2, pág. 28.
- [4] www.trinityprep.org/mazzar/thinkquest/history/berzelius
- [5] www.geocities.com/neveyaakon/electro_science/smith.html
- [6] Klein, M.J, Kox, A.J, Shulmann, R. (Eds). “The Collected Papers of Albert Einstein” Princeton: Princeton University, 1987. Vol: 5
- [7] www.museoeletrico.com/storia/hertz.html
- [8] Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, “Física Moderna”, Terceira Edição, Editora LTC
- [9] www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph/geschichte/09hallwachs/html
- [10] www.nobelprize.org/physics/laureates/1903/lenard-bio.html
- [11] www.nobelprize.org/physics/laureates/1906/thomson-bio.html
- [12] www.nobelprize.org/physics/laureates/1918/planck-bio.html
- [13] www.nobelprize.org/physics/laureates/1923/millikan-bio.html
- [14] www.feiradeciencias.com.br/sala23/23_ma02.asp
- [15] Millikan, R., Physical Review **7** (Março 1916), 355–388. Um resumo deste artigo — e resultados anteriores —, foram publicados por Millikan no Physical Review **4** (1914), 73 e, ainda, no Physical Review **6** (1915), 55.
- [16] George C. Lisensky and Rona Penn, Margaret J. Geselbracht and Arthur B. Ellis, “Periodic Properties in a Family of Common Semiconductors – Experiments with Light Emitting Diodes”.
- [17] www.myspace.eng.br
- [18] O’Connor, P. J., e L. R. O. O’Connor, “Measuring Planck’s constant using a light emitting diode”, The Physics Teacher, vol 37, 10 (1974) 423-425 .
- [19] www.howstuffworks.com
- [20] Cavalcante, M. A., C. R. C. Tavoraro, “Física Moderna Experimental”, Editora Manole Ltda (2003), 1º Edição.
- [21] Cavalcante, M. A., C. R. C. Tavoraro, D. F. Fagundes e J. Muzinatti, “Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades”, *Física na Escola*, **3**, 1 (2002) 24-29.
- [22] Jameco Electronics; Vol. 221; February – April/2002